

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA,  
NUCLEARE E DELLA PRODUZIONE  
SEZIONE PRODUZIONE



Atti n. DIMNP-003(2009)



RELAZIONE FINALE RELATIVA AL  
PROGRAMMA DI RICERCA COFINANZIATO  
MINISTERO DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA (PRIN)  
UNIVERSITÀ DI PISA PROT. 2004093934\_003  
DENOMINATO

**CONTROLLO DELLE SUPERFICI DI  
PRODOTTI IN PIETRA NATURALE**

*Prof. Ing. Giovanni TANTUSSI*  
*Prof. Ing. Michele LANZETTA*

PISA, 03 MARZO 2009



## Sommario

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.      | Base di partenza scientifica nazionale o internazionale .....  | 5  |
| 1.1     | Competenze già sviluppate presso l'unità di ricerca (UR) .....   | 6  |
| 1.1.1   | Controllo di prodotto tramite visione artificiale .....  | 6  |
| 1.1.2   | Controllo dei processi di lavorazione tramite visione artificiale .....  | 7  |
| 1.1.3   | Lavorazioni di materiali lapidei .....   | 8  |
| 2       | Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti .....  | 8  |
| 2.1     | Analisi con metodi ottici di superfici lucidate .....  | 8  |
| 2.1.1   | Il riflettometro .....   | 9  |
| 2.1.1.1 | Primo prototipo: riflettometro basato su sorgente di illuminazione visibile ..                                   | 9  |
| 2.1.1.2 | Secondo prototipo: riflettometro basato su sorgenti di illuminazione<br>intercambiabili NIR .....                | 9  |
| 2.1.1.3 | Terzo prototipo: riflettometro ingegnerizzato .....  | 10 |
| 2.1.1.4 | Prove sperimentali .....   | 10 |
| 2.1.1.5 | Risultati ottenuti con l'uso dei riflettometri .....   | 11 |
| 2.1.2   | Caratterizzazione di superfici a bassa rugosità ( $R_a < 4$ micron) .....  | 12 |
| 2.1.2.1 | Caratterizzazione delle superfici con metodi a contatto .....  | 12 |
| 2.1.2.2 | Analisi mediante glossmetro .....  | 13 |
| 2.1.2.3 | Analisi spettrofotometrica .....   | 13 |
| 2.1.3   | Caratterizzazione di superfici ad elevata rugosità .....   | 14 |
| 2.1.3.1 | Caratterizzazione di superfici lavorate con getto d'acqua con profilometria<br>ottica .....                      | 14 |
| 2.1.3.2 | Rilievo di elevate protrusioni e cavità superficiali con sistema di visione e<br>illuminazione strutturata ..... | 14 |
| 2.1.3.3 | Ricostruzione tridimensionale delle superfici con visione stereoscopica ....                                     | 15 |
| 2.2     | Incisione di codici su materiali lapidei .....   | 15 |
| 2.2.1   | Incisione laser di marmo di Carrara .....  | 15 |
| 2.2.2   | Miglioramento della leggibilità di caratteri incisi con laser su marmo di Carrara<br>.....                       | 16 |
| 2.2.3   | Caratterizzazione di caratteri incisi .....  | 16 |
| 2.2.4   | Valutazione di tecniche di incisione laser e getto d'acqua .....   | 17 |
| 2.2.5   | Controllo di qualità di caratteri incisi .....   | 17 |
| 3       | Trasferimento dei risultati in ambito industriale .....  | 17 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Sistema di acquisizione di lastre lucidate ..... | 17 |
| 3.2 | Altre attività collegate .....                   | 18 |
| 4   | Attività di divulgazione e pubblicazioni.....    | 18 |
| 4.1 | Pubblicazioni .....                              | 19 |
| 5   | Prodotti della Ricerca eseguita .....            | 21 |
| 6   | Ringraziamenti .....                             | 23 |
| 7   | Riferimenti bibliografici .....                  | 23 |

# **1. Base di partenza scientifica nazionale o internazionale**

Se si esaminano i dati statistici relativi alla lavorazione di materiali lapidei e alla produzione di macchinari con particolare riferimento allo sbilanciamento tra esportazioni e importazioni, emerge chiaramente la leadership tecnologica del nostro paese a livello mondiale. L'enorme crescita della concorrenza soprattutto ad opera dei paesi emergenti impone però di adottare politiche di innovazione atte a mantenere tale ruolo per il sistema paese.

La visione artificiale è nata con la robotica negli anni settanta e si è sviluppata in maniera crescente nel campo della robotica industriale e dell'automazione negli ultimi due decenni. Le prime massicce applicazioni sono avvenute nell'industria elettronica. Con la rapida evoluzione delle tecnologie dell'informazione, questi sistemi stanno diventando sempre più interessanti per un numero crescente di applicazioni industriali e oggi rappresentano un settore di punta nel campo della produzione. Tra i sensori impiegati nell'industria, i sistemi di visione artificiale sono quelli di impiego più generale e sono strumenti flessibili che possono automatizzare con successo una delle più potenti capacità sensoriali dell'uomo. Vengono impiegati favorevolmente nella maggior parte delle operazioni produttive per controllo (ad esempio in ausilio di robot) e controllo di qualità (ad esempio per verificare la correttezza e correggere il risultato di operazioni precedenti). Tra le principali funzioni di tipo visivo vi sono: riconoscimento, misura, localizzazione e inseguimento. Nel montaggio, che rappresenta circa l'80% di tutte le operazioni industriali, i sistemi di visione sono correntemente utilizzati per rilevare presenza/assenza, identificazione, corretto assemblaggio, incollaggio e sigillatura e controllo di qualità, che è una delle più diffuse applicazioni sia in campo meccanico, sia elettronico.

Attualmente la frontiera nel campo della ricerca sulle applicazioni dei sistemi di visione è rappresentata da

- studio di sistemi integrati, per ridurre la complessità dell'hardware incorporando sempre maggiori funzioni a bordo dei sensori;
- miniaturizzazione, per aumentare la versatilità delle applicazioni nel caso di esigenze di ingombro limitato;
- visione tridimensionale (3D), la maggior parte delle applicazioni industriali sono di tipo 2D e non esistono ancora algoritmi consolidati che risolvano definitivamente il problema, ne' tantomeno prodotti commerciali;

- applicazione a lavorazioni non tradizionali. Nel campo della ricerca, come in campo industriale, oggi la potenza disponibile consente l'implementazione di algoritmi più complessi che permettono di trattare la variabilità e imprevedibilità dei prodotti naturali.

E' in quest'ultimo settore che si colloca la ricerca affidata all'Unità di Pisa. I problemi aperti riguardano essenzialmente la definizione di parametri oggettivi che possano essere correlati con i risultati delle lavorazioni superficiali su materiali lapidei, e lo sviluppo dei metodi per la loro determinazione sperimentale.

In [AS98I] è stata fornita una classificazione delle applicazioni della visione tridimensionale ai processi di produzione e indicata una rassegna delle principali tecniche utilizzate. Questa analisi critica di circa 50 articoli, unitamente alla bibliografia citata nelle altre pubblicazioni prodotte presso il DIMNP, fornisce un'ampia panoramica dello stato dell'arte nel campo dei controlli di visione artificiale.

Il progetto è stato condotto in collaborazione con le Unità di Ricerca (UR) dell'Università di Cassino (coordinatore del progetto), dell'Università de L'Aquila e del Politecnico di Milano.

## ***1.1 Competenze già sviluppate presso l'unità di ricerca (UR)***

Il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) vanta una prolungata e diversificata esperienza nelle applicazioni dei sistemi di visione artificiale in campo industriale, realizzate presso il proprio laboratorio di Visione Industriale. Una rassegna di tali realizzazioni è stata presentata nella forma di Technical Report al Scientific and Technical Committee Assembly (STC "A") del Cirp [Cirp01SV].

### **1.1.1 Controllo di prodotto tramite visione artificiale**

Presso il DIMNP è stato svolto uno studio, che si potrebbe definire pionieristico, che ha portato alla realizzazione del prototipo di un sistema di visione per la classificazione di piastrelle di marmo compiuta sia con un approccio di tipo statistico, sia facendo uso di reti neurali [5], [Carrara95]. Tale studio è stato poi esteso ad altri materiali lapidei come il granito [Carrara00] e all'analisi dei difetti [4], [Carrara97].

Nel campo dei controlli su parti meccaniche, presso il DIMNP sono state curate diverse applicazioni in tutti i casi sviluppando algoritmi originali, quali:

1. presenza/assenza o scambi di componenti di serrature per automobili,
2. misure di pezzi stampati [Amst99VS],

3. controllo di integrità e eventuale presenza di difetti dovuti al processo produttivo su o-ring [Mrq98] e
4. cuscinetti a sfera [Prime01VS] con un sistema di visione, rispettivamente in collaborazione con Magna, Siemens e SKF.
5. controllo di qualità sulla pelle per la rifilatura, sull'argomento sono stati attivati due progetti finanziati di cui uno in corso.

### **1.1.2 Controllo dei processi di lavorazione tramite visione artificiale**

Le tecniche di visione artificiale sono state applicate anche ad una pluralità di processi come ausilio per l'automazione e il controllo, di cui vengono elencate le più significative.

- Per le operazioni robotizzate assistite tramite visione artificiale in campo tridimensionale è necessaria l'implementazione di sofisticati modelli per la descrizione della configurazione geometrica e del comportamento dei diversi componenti del sistema di visione (telecamera/e, lenti, ecc.). In [AS98II] sono stati proposti due metodi per la localizzazione basati su approcci radicalmente diversi: il primo con reti neurali e singola telecamera, il secondo, sviluppato in collaborazione con l'Università di Stanford, per risolvere il problema delle corrispondenze tra immagini stereo.
- E' stato sviluppato e applicato un metodo di calibrazione e localizzazione tridimensionale stereo basato su reti neurali [AS96] e la relativa estensione al caso di tre telecamere [Elot96]. Tale sistema opera in tempo reale ed è in grado di ricostruire la posizione nello spazio dell'oggetto osservato.
- Con particolare riferimento al montaggio, è stato proposto un sistema integrato tra un sensore di forza e di visione, per il problema peg-in-hole [Icme98].
- In [Amst96] è stato proposto un metodo per aumentare la precisione nel rilevamento della posizione di oggetti in 3-D in moto lungo traiettorie note a priori.
- In [Adm97] viene descritto un metodo semplice per l'acquisizione di profili bidimensionali da prototipi in legno al fine di programmarne il ciclo di lavorazione alle macchine utensili.

Nell'ambito del Progetto Nazionale biennale SPI, è stato realizzato presso il DIMNP un sistema di controllo on-line di saldature per una cella automatizzata [Aitem99].

Sono state curate inoltre numerose esperienze nel campo del controllo dello stato dell'utensile per lavorazioni meccaniche (TCM) [Ampt99] [Iwk96].

### **1.1.3 Lavorazioni di materiali lapidei**

Nel precedente Cofin 2001 l'UR di Pisa ha sviluppato un prototipo di macchina di prova per perline diamantate che ha permesso di realizzare in laboratorio test per la determinazione delle condizioni ottimali di taglio con filo diamantato [ROC03] [Aitem03] [Aitem]

## **2 Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti**

I principali temi affrontati nel corso della ricerca sono stati:

- analisi con metodi ottici di superfici lucidate
- caratterizzazione delle superfici con diverse metodologie
- incisione di codici su materiali lapidei

### **2.1 *Analisi con metodi ottici di superfici lucidate***

Lo studio ha riguardato l'applicazione di metodi ottici, basati sull'analisi dei raggi riflessi su una superficie a vari livelli di lavorazione e sulla correlazione fra tali dati e le caratteristiche superficiali (essenzialmente la rugosità) di campioni di materiale lapideo a diversi gradi di lavorazione.

La principale caratteristica estetica di un manufatto in materiale lapideo lucidato è la lucentezza. Lo studio ha dimostrato un legame teorico e sperimentale tra la riflettanza (parametro quantitativo direttamente legato alla frazione di luce riflessa in direzione speculare) alla finitura superficiale ottenuta con una data lavorazione di lucidatura.

I campioni sono stati soprattutto forniti dall'Unità di Cassino, ma l'indagine è stata applicata anche a vari tipi di materiali reperiti sul mercato.

Per quanto riguarda la dipendenza dalla rugosità del rapporto tra luce riflessa e luce incidente, l'analisi bibliografica ha messo in evidenza due relazioni teoriche:

1. la prima valida per  $R_q$  molto minore della lunghezza d'onda della luce incidente;
2. la seconda, derivante dagli studi sul rendering delle superfici generate al calcolatore, mostra l'intensità della luce in una direzione in funzione della giacitura del piano, dell'angolo di incidenza e della rugosità prevista per una data direzione.



### **2.1.1 Il riflettometro**

Per la verifica delle relazioni ed in generale per gli studi sperimentali sulla riflettometria, è stata messa a punto un'apparecchiatura per l'esecuzione di analisi riflettometriche su campioni di piastrelle in materiale lapideo a diversi gradi di finitura superficiale ( $R_k < 4$  micron).

Tale dispositivo, realizzato in diverse configurazioni, è uno dei principali risultati del progetto.

#### **2.1.1.1 Primo prototipo: riflettometro basato su sorgente di illuminazione visibile**

Gli strumenti adoperati nella ricerca sperimentale, posizionati all'interno di una cella di acquisizione, appositamente realizzata per l'ottenimento di un ambiente d'analisi isolato e controllato, è composta da una fonte di luce coerente (laser He-Ne con lunghezza d'onda di 633 nm) da 6 mW ed un recettore posizionato per ricevere i raggi riflessi dai campioni. Il recettore è una videocamera ad alte prestazioni, con sensore CCD, monocromatica (8 bit) connessa ad un calcolatore per mezzo di una scheda A/D dedicata. La videocamera utilizzata per questo studio ha uno standard CCIR con risoluzione 768×576 pixel e su di essa è montato un treno di lenti con diaframma f/32 e lunghezza focale di 80 mm. La fonte luminosa è stata attenuata con un filtro al 97%.

La strumentazione adoperata per l'analisi riflettometrica è stata posizionata su una attrezzatura modulare in alluminio appositamente realizzata per la regolazione precisa degli angoli di posizionamento del raggio di ispezione e del sensore matriciale. L'asse del raggio laser incidente viene posizionato di volta in volta ad uno specificato angolo epsilon riferito alla perpendicolare alla superficie del campione. L'asse del recettore viene regolato di conseguenza in posizione speculare rispetto all'asse del raggio incidente.

Con questa tecnica la quantità di luce riflessa delle immagini acquisite viene valutata a livello di pixel usando software ed hardware specifici per l'immagine processing.

#### **2.1.1.2 Secondo prototipo: riflettometro basato su sorgenti di illuminazione intercambiabili NIR**

In base ad un'analisi spettrofotometrica (dettagliata di seguito) sono emersi i vantaggi connessi con l'impiego di sorgenti ad elevata lunghezza d'onda per la caratterizzazione di materiali lapidei.

In particolare sono stati impiegati

- 4 diodi Laser Ø 5.6 mm con lunghezze d'onda nel vicino infrarosso (NIR) pari a: 785-980-1310-1550 nm e
- come sensore un Optical Beam Analyzing System operante nel range: 700-1800 nm.

Questa configurazione, di maggiore costo, oltre alla maggiore versatilità, consente di estendere il campo di indagine anche a campioni aventi valori di rugosità più elevati. Ad esempio, tale dispositivo, se inserito in una macchina di lucidatura multiteste, consente un eventuale controllo anche in fasi intermedie del processo.

### **2.1.1.3 Terzo prototipo: riflettometro ingegnerizzato**

In collaborazione con l'Unità di Cassino è stata realizzata una versione compatta del secondo tipo di riflettometro con singola sorgente di illuminazione NIR ottimizzata in base ai risultati delle prove svolte con il secondo prototipo.

Sono state inoltre sviluppate diverse configurazioni per l'esecuzione in automatico di misure ripetute su campioni, tramite una movimentazione controllata del dispositivo e/o del manufatto da esaminare.

Il sistema, a 3 assi controllati, prevede diverse configurazioni (con riflettometro mobile e manufatto fisso e viceversa) e consente di impostare la strategia per l'acquisizione automatica in punti uniformemente distribuiti sulla superficie da controllare.

### **2.1.1.4 Prove sperimentali**

Sono stati analizzati:

- piastrelle in Breccia Sarda Chiara a dodici stadi di lavorazione (gli ultimi tre di lucidatura, gli altri di finitura e sgrossatura),
- tre diversi tipi di Coreni (Nocciolato, Perlato e Mezza Perla) a tre stadi di lavorazione (forniti dall'Unità di Ricerca dell'Università di Cassino),
- quattro diversi tipi di Marmi all'ultimo stadio di lucidatura,
- tre diversi tipi di Graniti all'ultimo stadio di lucidatura,
- un campione di Travertino all'ultimo stadio di lucidatura.

Le acquisizioni sono state effettuate utilizzando angoli di incidenza variabili da 10° a 80°, ad intervalli di 10°, ed anche a 85°.

Per ogni angolo di incidenza e per ogni campione le immagini catturate sono state sette: la prima è impiegata per la verifica della messa a fuoco dello spazio da inquadrare e il

dimensionamento del campo di rilevamento; la seconda rappresenta l'immagine del fascio riflesso da uno specchio ad alta precisione (99,7% di riflessione) sul sensore per la taratura del sistema (immagine che viene presa come riferimento per il confronto con le rimanenti cinque); le ultime cinque rappresentano le immagini del fascio riflesso, in cinque punti diversi, dal campione al sensore.

Sono state eseguite due campagne di prova:

1. nel primo caso è stato mantenuto un angolo di incidenza fisso e sono state eseguite rilevazioni su campioni dello stesso materiale, ma con finitura superficiale differente;
2. nel secondo caso le rilevazioni sono state eseguite mantenendo lo stesso campione, ma variando l'angolo di incidenza del laser.

#### **2.1.1.5 Risultati ottenuti con l'uso dei riflettometri**

Il confronto della caratteristica dell'intensità di luce riflessa, ottenuta con il primo prototipo di riflettometro, con la curva estrapolata dalle caratteristiche della prima equazione teorica, trova una buona correlazione tra le prove sperimentali e gli aspetti teorici dei fenomeni ottici. Bisogna tenere presente che tale equazione è valida solo per valori di rugosità  $R_q$  inferiori almeno di un ordine di grandezza rispetto alla lunghezza d'onda del raggio incidente. Poiché, nella maggior parte dei casi, la rugosità delle superfici dei materiali lapidei a vari stadi di lucidatura supera il valore di 0.1 micron, l'analisi teorica può essere impiegata solo in casi particolari come per la super-lucidatura dei marmi (es. lastre di Marmo di Carrara per rivestimento  $R_a=0.01$  e  $R_q=0.052$ ).

L'indagine ha permesso di identificare per ogni condizione l'angolo di incidenza ottimale per cui si ha la massima sensibilità.

Dall'ampia sperimentazione è scaturito che

- è necessario utilizzare sorgenti ad elevata lunghezza d'onda per estendere il campo di indagine ad elevati valori di rugosità
- per materiali traslucidi, come la maggior parte dei materiali lapidei, l'angolo di incidenza deve essere elevato ( $>45^\circ$ ).

L'impiego del secondo prototipo di riflettometro ha permesso di conseguire i seguenti risultati:

- miglioramento dell'attrezzatura meccanica per facilitare sia il rapido posizionamento degli angoli di incidenza e di riflessione che il corretto riferimento tra il riflettometro e la superficie che richiede un'elevata precisione,

- l'impiego di diverse sorgenti nel campo del vicino infrarosso per migliorare la sensibilità dell'apparecchiature.

Il parametro misurato dal riflettometro è la riflettanza, di cui è nota l'espressione teorica dalla letteratura in funzione di:

- caratteristiche del materiale (indice di rifrazione) e della superficie (finitura superficiale),
- configurazione dello strumento (angolo di incidenza del raggio luminoso)

Il confronto tra le misure effettuate e i dati relativi al materiale (rilevati come indicato di seguito) hanno mostrato un buon accordo con il modello teorico.

La campagna di prove ha permesso di determinare la configurazione dello strumento che consente di massimizzare la sensibilità dello strumento e di estendere l'intervallo di misura della rugosità, caratterizzata tramite il parametro  $R_k$ .

I risultati di questo studio sono suscettibili di brevettazione data l'innovatività del dispositivo e l'interesse industriale [il dispositivo è stato brevettato con il supporto dell'Università di Pisa, brevetto n. PI/2007/A/000105].

## **2.1.2 Caratterizzazione di superfici a bassa rugosità ( $R_a < 4$ micron)**

### **2.1.2.1 Caratterizzazione delle superfici con metodi a contatto**

Tutti i campioni sono stati analizzati con il rugosimetro a contatto presente in laboratorio al fine di avere un riferimento oggettivo relativo alle misure con i metodi ottici.

Sono state eseguite 20 acquisizioni per campione con lunghezza d'onda di taglio di 0.08, prendendo in considerazione i parametri  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_{pk}$ ,  $MR1$  e  $MR2$ .

I parametri  $R_{vk}$ ,  $R_{pk}$ ,  $MR1$  e  $MR2$  non hanno dato risultati soddisfacenti.

I parametri di rugosità  $R_a$  e  $R_q$ , hanno dato risultati simili, ma poco sensibili a piccole variazioni di finitura superficiale.

Il parametro  $R_k$ , che tiene conto della forma del profilo superficiale, rispecchia con maggiore fedeltà le caratteristiche riflettometriche analizzate precedentemente.

Da un'analisi qualitativa delle superfici esaminate è emerso chiaramente che l'effetto delle lavorazioni di lucidatura sulla maggior parte dei materiali lapidei (ad eccezione del marmo) è

quello di rimuovere le creste delle asperità superficiali lasciando inalterate le cavità presenti dovute alla microporosità. L'aspetto che ne deriva è quello tipico di una superficie a plateau le cui caratteristiche possono essere notoriamente meglio espresse attraverso il parametro  $R_k$ .

Per il rilievo dei profili di rugosità il rugosimetro è stato corredato con un sistema di movimentazione a 3 assi controllati, per l'acquisizione automatica di valori in diverse zone della superficie da analizzare e per la scansione di tratti di superficie tramite l'acquisizione di profili contigui.

#### **2.1.2.2 Analisi mediante glossmetro**

I campioni dei lapidei sono stati analizzati anche con un glossmetro commerciale, ad angolo speculare di  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $85^\circ$ , che restituisce valori di brillantezza espressi in GU secondo la normativa ASTM D 532-89.

Questo tipo di strumento è quello maggiormente adoperato nell'industria lapidea per la misura della lucentezza dei prodotti in pietra lucidati. Dalle acquisizioni effettuate è risultato che i valori in uscita dal glossmetro mostrano un amplissima dispersione, soprattutto per l'angolo incidente di  $20^\circ$ . Inoltre lo strumento non è in grado di eseguire analisi su prodotti con rugosità superficiale superiore allo 0.1 micron.

L'analisi sperimentale e il confronto con le altre tecniche hanno mostrato serie limitazioni nell'utilizzazione dello strumento che del resto è stato concepito e realizzato per misurare la lucentezza di altri tipi di superfici (vernici, superfici metalliche, ceramiche ecc.).

#### **2.1.2.3 Analisi spettrofotometrica**

E' stata proposta una utilizzazione innovativa di uno spettrofotometro ad alta precisione che abbraccia uno spettro di luce 0.1-2,5 micron. Lo spettrofotometro ha consentito di valutare oggettivamente la quantità di luce riflessa, assorbita e trasmessa dai campioni. Le prove sono state eseguite con una sonda per solidi a fibra ottica con lampada a bulbo da  $1000^\circ\text{K}$  a luce bianca. I risultati ottenuti confermano e garantiscono una correlazione tra luce riflessa o assorbita e lo stato superficiale dei campioni.

Lo spettrofotometro rileva l'energia di Assorbanza/Riflettanza ed è in grado di dare informazioni sulla composizione chimica dei materiali in esame. Molto utile per analisi comparative sperimentali, tuttavia questo strumento non è adatto per controlli di processo on-line, ha tempi di elaborazioni elevati, è poco pratico ed è molto costoso. Lo strumento ha

comunque fornito utili indicazioni sulle lunghezze d'onde da impiegare per l'analisi riflettometrica.

### **2.1.3 Caratterizzazione di superfici ad elevata rugosità**

#### **2.1.3.1 Caratterizzazione di superfici lavorate con getto d'acqua con profilometria ottica**

E' stato realizzato un sistema per il rilievo di superfici senza contatto basato su profilometria ottica. Il sistema comprende

- un sensore commerciale di misura della distanza fra il sensore e la superficie ad elevata risoluzione (0,25 micron) e
- un sistema di movimentazione a 3 assi controllati da PC, realizzato con slitte motorizzate di elevata precisione.

Il sistema è stato validato tramite rugosimetro e permette di acquisire profili e porzioni di superficie.

Questo sistema è particolarmente adatto per l'analisi di superfici ad elevata rugosità ( $R_a > 4$  micron) come quelle ottenute dall'Unità di Milano con lavorazione a getto d'acqua.

L'analisi consente la valutazione degli effetti di diversi parametri del processo e sarà oggetto di una pubblicazione in collaborazione con l'Unità di Milano.

#### **2.1.3.2 Rilievo di elevate protrusioni e cavità superficiali con sistema di visione e illuminazione strutturata**

E' stata sviluppata una tecnica innovativa per determinare la presenza di protrusioni e cavità superficiali basata su un particolare tipo di illuminazione strutturata ideato ad hoc.

Allo scopo è stato realizzato un prototipo di un sistema portatile con telecamera e illuminatori in grado di rilevare la presenza di elementi di dimensione prestabilita ed è stato testato per il rilevamento di irregolarità superficiali di dimensioni comprese tra 0,3 e 0,5 mm su un'area inquadrata di  $35 \times 35 \text{ mm}^2$ .

Allo sviluppo hanno collaborato anche alcuni studenti nell'ambito di un progetto didattico [vedere ringraziamenti].

I risultati sono suscettibili di brevettazione della particolare tecnica di rilievo sviluppata che mira alla commercializzazione di dispositivi compatti ed economici per il controllo di qualità.

Sono state prodotte due memorie accettate preliminarmente per la pubblicazione su due riviste nazionali specializzate: Marmo Macchine Classic e Automazione e Strumentazione [che saranno pubblicate dopo la brevettazione].

### **2.1.3.3 Ricostruzione tridimensionale delle superfici con visione stereoscopica**

Nell'ambito di un tirocinio in Ingegneria Meccanica è stata sviluppata un'attrezzatura per l'acquisizione di superfici e sviluppato il relativo software per la ricostruzione 3D.

Il sistema è basato su algoritmo di visione stereoscopica. La coppia di immagini stereo viene ottenuta tramite traslazione del campione o della telecamera.

Questo sistema è adatto per rilevare superfici molto scabre (con escursioni superiori al millimetro).

## **2.2 Incisione di codici su materiali lapidei**

Quest'attività, prevista ai fini di sviluppare metodi per l'identificazione e la rintracciabilità dei manufatti in materiale lapideo, prevede il confronto delle tecnologie di incisione laser e con getto d'acqua ad alta pressione su provini di marmo di Carrara e perlato di Coreno.

### **2.2.1 Incisione laser di marmo di Carrara**

Nelle sedi di Cassino e di Pisa sono stati realizzati piani sperimentali rispettivamente su Perlato di Coreno e marmo di Carrara per l'ottimizzazione dei seguenti parametri per incidere con adeguata definizione solchi su una superficie in materiale lapideo:

- potenza del laser,
- velocità di scansione e
- grado di umidità del materiale.

Per quanto riguarda le prove eseguite dall'Unità di Pisa, sono emerse le seguenti informazioni:

- con potenze minori di 3W: si ottiene la formazione di zone termicamente alterate, ma non si ha alcuna asportazione di materiale;
- con potenze comprese tra 4 e 10W: la quantità di materiale asportato cresce linearmente con il crescere della potenza e tale aumento è particolarmente vistoso;

- con potenze maggiori di 10W; la quantità di materiale asportato sembra essere praticamente costante all'aumentare della potenza applicata, anche se la curva risulta essere leggermente crescente.

Inoltre è emerso che il materiale umido presenta una maggior asportazione di materiale probabilmente a causa delle particelle di acqua che, evaporando rapidamente, si espandono in maniera quasi esplosiva provocando la fratturazione del materiale.

Questa sperimentazione, oltre a dimostrare la fattibilità del processo di incisione di codici (a barre o alfanumerici) tramite laser, permette di determinare i parametri necessari per ottenere un solco di dimensioni prestabilite.

### **2.2.2 Miglioramento della leggibilità di caratteri incisi con laser su marmo di Carrara**

Mentre su materiali lapidei scuri il trattamento laser produce alterazioni cromatiche tali da generare un elevato contrasto fra le tracce prodotte dal laser e le zone non trattate, permettendo l'incisione di codici ad elevata leggibilità da parte dei comuni scanner per codici a barre, questo non si verifica nel caso del marmo di Carrara, in cui le tracce risultano scarsamente contrastate.

Per migliorare la leggibilità è stata messa a punto una tecnica che prevede l'applicazione sulla superficie di marmo di pigmenti dispersi in una resina liquida che una volta essiccata ancora stabilmente il pigmento al materiale. Il successivo trattamento laser asporta il pigmento generando tracce altamente leggibili. La marcatura può essere effettuata sia in positivo che in negativo.

Sono in corso prove per verificare la resistenza agli agenti atmosferici.

### **2.2.3 Caratterizzazione di caratteri incisi**

Le norme ISO relative alla stampa di caratteri indicano i requisiti per la leggibilità che rappresentano anche le specifiche per i processi di incisione

Per la caratterizzazione dei solchi realizzati dalle Unità di Milano, Cassino e Pisa è stata sviluppato da quest'ultima un sistema basato su visione artificiale e illuminazione strutturata.

I metodi testati per la proiezione di pattern sui provini sono

- l'uso di un videoproiettore, che ha presentato una buona flessibilità nella generazione delle griglie, ma presentava una risoluzione un ordine di grandezza superiore a quella richiesta;



- un laser HeNe con lente cilindrica per la realizzazione di una lama di luce, che ha mostrato analoghe caratteristiche di risoluzione;
- il laser di cui sopra con l'aggiunta di un reticolo di diffrazione, che ha permesso di ottenere griglie con passo inferiore a 0,1 mm.

Le immagini sono state acquisite ad altissima risoluzione (1 micron/pixel).

Tale tecnica consente di evidenziare la curva deformata che è stata interpolata ed analizzata tramite l'estrazione di parametri geometrici.

Le tre tecniche citate possono essere applicate per la ricostruzione di superfici ad elevata rugosità.

#### **2.2.4 Valutazione di tecniche di incisione laser e getto d'acqua**

L'analisi comparativa ha mostrato una maggiore penetrazione del getto d'acqua.

Le tracce ottenute con laser hanno mostrato contorni più regolari e definiti.

L'analisi tecnico economica sarà oggetto di una pubblicazione in collaborazione con le Unità di Cassino e di Milano.

#### **2.2.5 Controllo di qualità di caratteri incisi**

E' stato realizzato un sistema di acquisizione di immagini con illuminazione radente, in grado di eseguire il controllo di qualità e l'OCR sui manufatti incisi con i diversi processi su superfici lucidate, insensibile alla variabilità dei materiali. Tale sistema sarà facilmente applicabile industrialmente una volta che il processo di incisione di caratteri si sarà affermato, sia a scopo decorativo sia per la rintracciabilità dei prodotti.

### **3 Trasferimento dei risultati in ambito industriale**

#### **3.1 Sistema di acquisizione di lastre lucidate**

L'azienda Eurogranit che svolge l'attività di lucidatura nel comprensorio di Massa e Carrara ha dato incarico al Dipartimento per lo sviluppo di un sistema di acquisizione on-line di lastre lavorate (ca 2x3 m<sup>2</sup>).

L'introduzione di dispositivi di tipo ottico, anche se a livello di sofisticazione limitato è altamente innovativo per il settore e rappresenta una potenzialità di diffusione della tecnologia (per imitazione) per il controllo di qualità con sistemi di visione.

Sul prototipo realizzato sono state prodotte 3 pubblicazioni.

### **3.2 Altre attività collegate**

L'ing. S. Gentile, ha svolto il I anno di dottorato in Ingegneria Meccanica, sul tema Applicazioni Industriali di Sistemi di Visione Artificiale al settore lapideo e conciario. Attualmente è titolare di una società di ingegneria.

La società Salvatori di Querceta (LU) che esegue trattamenti superficiali ha terminato nel 2005 una collaborazione annuale con il Dipartimento per il miglioramento del proprio sistema qualità.

La macchina per test di perline diamantate su materiali lapidei, sviluppata nel corso del precedente PRIN, è stata utilizzata per test su materiali metallici su richiesta della società Lochtmans di Avenza (MS) produttrice di macchine per il taglio con filo diamantato. Su tale applicazione è stata presentata una pubblicazione al Convegno dell'AITEM.

Sull'applicazione industriale di tale macchina, presentata nelle fiere internazionali di Verona e Carrara, ha manifestato interesse la società Benetti (MS) produttrice di macchine e utensili per la lavorazione di materiali lapidei.

E' stata messa a punto un'attrezzatura sperimentale innovativa e svolte le relative prove per determinare l'abrasività di diversi materiali lapidei. Tale progetto è stato svolto in collaborazione con un professore in visita nell'ambito di un accordo Socrates stipulato appositamente con l'Università di Afyon (Turchia).

## **4 Attività di divulgazione e pubblicazioni**

I due prototipi di riflettometro sono stati presentati rispettivamente alla Fiera Carrara Marmotec e alla Fiera di Verona Marmomacc (nel corso del 2006), principali eventi di divulgazione per il settore lapideo. In entrambe le occasioni è stato organizzato dall'Unità di Pisa un convegno denominato **UniVerso Lapidei** per la presentazione dei risultati del progetto, in cui tutti i partner hanno presentato le loro attività.

Il riflettometro è stato inoltre presentato nel corso di TRASLA - Convegno “la Ricerca per le Apuane”, Carrara, 7-8 Luglio 2006 e inserito nella relativa banca dati.

#### **4.1 Pubblicazioni**

Per ragioni brevettuali, sono tuttora in corso di preparazione articoli sui seguenti argomenti:

- Improved Gloss Measurement of Polished Ornamental Stones using an Artificial Vision System (per rivista)
- Measurement of the Surface Roughness of Polished Stones by Specular Reflectance (per rivista)
- Analyses of Polished Stone Surfaces by Optical Methods (per convegno)
- Processing and Inspection of Ornamental Stone Surfaces (poster a convegno)
- Rilievo di difetti superficiali su materiali lapidei con un sistema di visione artificiale basato su illuminazione strutturata (per rivista)

1. MICHELE LANZETTA; SANTO GENTILE; TANTUSSI G.; FRANCESCO RIZZELLO; MICHELE COLUCCIA; GIOVANNI GAGGIO (2006). Pre-posa di lastre in materiale lapideo assistita da computer (Computer-aided pre-installation for stone slabs)

MARMO MACCHINE ATTREZZATURE E ACCESSORI VARI vol. vol. 4, n. 190 pp. 102-112 ISSN: 0392-6303 Lingua: Italiano e Inglese

Keywords: Artificial vision, Stone labs, Image acquisition

5 figs., 6 bibl.refs.

2. TANTUSSI G.; LANZETTA M.; ROMOLI V. (2005). Diamond wire cutting of cast iron

A.I.Te.M 2005, 6th Conference of the Italian Association of Mechanical Technology (September 7th-9th, 2005) vol. Unico pp. 100-113

3. LANZETTA MICHELE, Fanti Federica, TANTUSSI GIOVANNI (2008)

[Automating and visually inspecting product marking \(Part One\) / Automazione e controllo visivo della marcatura di prodotti \(Parte Prima\)](#), MARMO MACCHINE CLASSIC, vol. Year 38, n. 200, pp 30, tot. pag 7, tot. autori 3

4. LANZETTA MICHELE, Fanti Federica, TANTUSSI GIOVANNI (2008)

[Automating and visually inspecting product marking \(Part Two\) / Automazione e controllo visivo della marcatura di prodotti \(Parte Seconda\)](#), MARMO MACCHINE CLASSIC,vol. Year 38, n. 201,pp 72,tot.pag 7,tot. autori 3

5. LANZETTA MICHELE, TANTUSSI GIOVANNI, Zambardi Valerio (2008)  
[Rilievo micrometrico di superfici con metodi ottici](#), AUTOMAZIONE E STRUMENTAZIONE ELETTRONICA INDUSTRIALE,vol. Anno LVI, n. 5,pp 178,tot.pag 7,tot. autori 3

6. LANZETTA MICHELE, TANTUSSI GIOVANNI, Gentile Santo (2008)  
[Developing a reflectometer to control polishing on stone materials / Sviluppo di un Riflettometro per il controllo della lucidatura di materiali lapidei](#), MARMO MACCHINE CLASSIC,vol. Year 38, n. 199,pp 34,tot.pag 14,tot. autori 3

7. LANZETTA MICHELE, TANTUSSI GIOVANNI, Gentile Santo (2007)  
[Metodo e dispositivo optoelettronico per una valutazione quantitativa di qualità di una superficie](#), Italia,tot. autori 3,**2007**

8. LANZETTA MICHELE, Bernardelli Alessandro, Lenzi Guido, TANTUSSI GIOVANNI, Annoni Massimiliano (2008)  
[Characterization of abrasive waterjet processed surfaces](#), Second International Congress Dimension Stones (ICDS) XXI Century challenges, pp 245-250, Carrara (MS), Italia,vol. Unico, tot. autori 5

9. LANZETTA MICHELE, Fanti Federica, TANTUSSI GIOVANNI, Annoni Massimiliano, Turchetta Sandro (2008)  
[Characterization and measurement of stone engravings](#), Second International Congress Dimension Stones (ICDS) XXI Century challenges, pp 193-198, Carrara (MS), Italia,vol. Unico, tot. autori 5

10. TANTUSSI GIOVANNI, LANZETTA MICHELE, Gentile Santo, Depperu Gianni (2008)  
[Diamond wire cutting: failure modes, risks for safety and workers' protection](#), Second International Congress Dimension Stones (ICDS) XXI Century challenges, pp 147-152, Carrara (MS), Italia,vol. Unico, tot. autori 4

11. Clemente Marco, TANTUSSI GIOVANNI, LANZETTA MICHELE (2007)  
[Marble cutting wear of sintered diamond beads: characterisation and measuring methods/Usura di perline diamantate sinterizzate nel taglio del marmo: caratterizzazione e metodi di misura](#), DIAMANTE. APPLICAZIONI & TECNOLOGIA, vol. Anno 13, n. 51, pp 65, tot. pag 9, tot. autori 3
12. Michele Lanzetta, Santo Gentile, Francesco Rizzello, Michele Coluccia, Giovanni Gaggio (2006)  
[Sistema innovativo HW-SW finalizzato alla composizione virtuale di grandi facciate - per interni o esterni - con elementi, di varia foggia e dimensioni, di lastre digitalizzate](#), Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione - Università di Pisa
13. Michele Lanzetta, Santo Gentile, Giovanni Tantussi, Francesco Rizzello, Michele Coluccia, Giovanni Gaggio (2006)  
[Pre-posa di lastre in materiale lapideo assistita da computer \(Computer-aided pre-installation for stone slabs\)](#), Marmo Macchine Classic, vol. 4, num. 190, pp 102-112, tot. pag 11, tot. autori 6

## **5 Prodotti della Ricerca eseguita**

Nel corso del progetto sono stati realizzati numerosi prototipi con componenti già disponibili presso il Dipartimento e/o acquistati con i fondi della ricerca.

I prototipi realizzati hanno avuto una duplice funzione:

- sono stati impiegati per l'acquisizione dei parametri necessari alla valutazione dei processi messi a punto dai partner del progetto e
- come dimostratori per un auspicabile trasferimento in ambito industriale, allo scopo di controllare i processi relativi.

La descrizione dei vari prototipi, che hanno rappresentato la parte predominante degli sforzi di ricerca, è già inquadrata al paragrafo 2.

Di seguito vengono elencati i prototipi realizzati con le principali caratteristiche e scopi.

Il prototipo di riflettometro, realizzato in tre versioni, è uno strumento innovativo.

La versione basata su sistema di visione artificiale, presenta potenzialità di impiego in ambito industriale, data la semplicità del principio sfruttato per il progetto.

La versione NIR è essenzialmente da laboratorio ed è utilizzabile per analisi future su materiali anche diversi dai lapidei.

La versione ingegnerizzata è finalizzata all'impiego industriale ed è scaturita direttamente dal test del prototipo precedente su diversi campioni.

Il riflettometro è stato inoltre interfacciato con un sistema di movimentazione configurabile e a controllo numerico.

Per l'analisi delle superfici in materiale lapideo lucidate e trattate tramite laser e getto d'acqua sono state messe a punto due stazioni automatizzate di acquisizione basata su componenti commerciali che non presentano particolari caratteristiche di innovazione, ma che sono state necessarie per avere un riscontro oggettivo tra la strumentazione innovativa realizzata e metodologie di analisi consolidate.

I due dispositivi sono basati rispettivamente su

- rugosimetro a contatto e
- profilometro ottico.

Sono stati inoltre realizzati due sistemi di visione per il rilievo di superfici con diversi range di rugosità basati rispettivamente su

- visione monoculare con illuminazione a diverse sorgenti cromatiche per il rilievo di asperità di dimensione prestabilita
- visione stereoscopica per la mappatura di superfici tramite matching

Per il rilievo di incisioni sono state realizzate diverse configurazioni di sistemi di visione con illuminazione strutturata basati su videoproiettore, lama di luce laser e reticolo di diffrazione.

Con quest'ultimo è stata svolta l'analisi completa dei provini realizzati dai partner.

E' stato realizzato il prototipo di un sistema di acquisizione di immagini di lastre lucidate e la relativa archiviazione.

Tale sistema è stato installato su linea di produzione presso un'azienda che ha cofinanziato lo sviluppo.

E' stato anche sviluppato un software per la realizzazione di mosaici (pre-posa virtuale) con le immagini dei manufatti reali.

E' stata messa a punto un'attrezzatura sperimentale innovativa per valutare l'abrasività di materiali lapidei basata su piattaforma rotante che supporta il provino e con un puntale sottoposto a forza controllata di cui viene valutata l'usura tramite acquisizione dati.

## 6 Ringraziamenti

Al progetto ha collaborato l'Ing. Santo Gentile della società GDTech s.n.c. per lo sviluppo del riflettometro.

Si ringrazia la società Diessechem s.r.l. di Milano per l'assistenza e le attrezzature impiegate nelle misure spettrofotometriche.

Il sistema di rilievo delle asperità è stato sviluppato dagli studenti Matteo Tanzini, Alessandro Serio, Simone Natali, Massimo Satler e Giuseppe Angotzi nell'ambito del progetto didattico di Automazione dei Processi Produttivi del Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione, a.a. 2005-06.

Il sistema di visione per la ricostruzione stereo di superfici scabre è stato sviluppato dallo studente Daniele Ciomei nell'ambito del tirocinio del Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica.

Si ringraziano inoltre

- Ing. Marco Clemente, Ing. Camillo Scionti e Ing. Giacinto Lombardi (tesi di laurea in Ingegneria Meccanica del vecchio ordinamento)
- Sig.ra Federica Fanti (acquisizione di superfici scabre tramite illuminazione strutturata), Ing. Guido Lenzi, Ing. Alessandro Bernardelli (caratterizzazione di superfici scabre ottenute tramite lavorazione a getto d'acqua), Ing. Alessandro Maggesi (ingegnerizzazione del riflettometro), Ing. Valerio Zambardi (sviluppo di un sistema integrato a contatto e ottico per l'analisi di superfici) – tirocini Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

## 7 Riferimenti bibliografici

[AS98I] Lanzetta, M.: Visione Tridimensionale nei Processi di Produzione - «Stato dell'Arte», Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale, ANIPLA, Associazione Nazionale Italiana Per L'Automazione, n. 2, Anno XLVI, Febbraio 1998, pag. 155-164

[Cirp01SV] Lanzetta, M.: Industrial applications of artificial vision in automated assembly, Technical Report presentato personalmente al Scientific and Technical Committee Assembly (STC "A"), 51st CIRP General Assembly, Nancy, Francia, 19-25 Agosto, 2001

[Carrara95] Tantussi, G.; Lanzetta, M.: Nuove Applicazioni dell'Analisi di Immagini nel Settore dei Lapidei, TecnoLapidei'95, Convegno su «La coltivazione in sotterraneo e la tutela

ambientale», Carrara'95, XXVI Fiera Internazionale Marmi Macchine e Servizi, Carrara, 20 Maggio 1995

[Carrara00] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: Sviluppo e Confronto di Tecniche di Controllo di Qualità di Manufatti in Granito, Articolo su invito, Atti del Convegno «Studi e indagini sui materiali lapidei», Carrara 2000, XXI Fiera Internazionale Marmi, Macchine e Servizi, Ed. Tipografia Editrice Pisana, Carrara, 3 Giugno, 2000, pag. 21-30

[Carrara97] Tantussi, G.; Lanzetta, M.: Applicazioni dei Sistemi di Visione per il Riconoscimento di Difetti nel Settore Lapideo, Convegno su «La didattica e la ricerca per un nuovo sviluppo della risorsa marmo. Sicurezza, ambiente, produttività», Carrara'97, XVIII Fiera Internazionale Marmi, Macchine e Servizi, Carrara, 25 Maggio 1997

[Amst99VS] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: Vision System Calibration and Sub-Pixel Measurement of Mechanical Parts, AMST'99, Atti del 5° Congresso Internazionale su «Advanced Manufacturing Systems and Technology», CISM Courses and Lectures No. 406, Ed. E. Kuljanic, ISBN: 3-211-83148-7, Springer-Verlag, Wien New York, Udine, 3-4 Giugno, 1999, pag. 695-702

[Mrq98] Lanzetta, M.: The Quality Control of Critical Assembly Components: Visual Inspection of O-Rings, 2nd MRQ, Atti del 2o Congresso Internazionale su «Planned Maintenance, Reliability and Quality», Ed. G.J. McNulty, ISBN: 0 86339 7867, Oxford, UK, 2-3 Aprile, 1998, pag. 132-137

[Prime01VS] Lanzetta, M.; Tantussi, G.; Santochi, M.: The Process Control in Manufacturing: Inspection of Ball Bearings, PRIME 2001, 1st International Seminar on «Progress in Innovative Manufacturing Engineering», Ed. P. M. Lonardo, ISBN: 88-900559-0-1, Sestri Levante (GE), 20-22 Giugno, 2001, pag. 405-410

[AS98II] Lanzetta, M.: Visione Tridimensionale nei Processi di Produzione - Applicazioni, Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale, ANIPLA, Associazione Nazionale Italiana Per L'Automazione, n. 3, Anno XLVI, Marzo 1998, pag. 137-144

[AS96] Lanzetta, M.: Visione Stereoscopica con Reti Neurali, Automazione e Strumentazione Elettronica Industriale, ANIPLA, Associazione Nazionale Italiana Per L'Automazione, n. 7, Anno XLIV, Luglio/Agosto 1996, pag. 107-116

[Elot96] Lanzetta, M.: Calibrazione di un Sistema di Visione a Tre Telecamere Tramite Reti Neurali, Elettroottica '96, Atti del IV Convegno Nazionale «Strumentazione e Metodi di Misura Elettroottici», Milano, 29-31 Maggio, 1996, pag. 415-419

[Icme98] Lanzetta, M.; Dini, G.: An Integrated Vision-Force System for Peg-In-Hole Assembly Operations, ICME '98, CIRP International Seminar on «Intelligent Computation in



Manufacturing Engineering», Ed. R. Teti, Capri (NA), 1-3 Luglio, 1998, pag. 615-621

[Amst96] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: Monitoring Critical Points in Robot Operations with an Artificial Vision System, AMST'96, Atti del 4° Congresso Internazionale su «Advanced Manufacturing Systems and Technology», CISM Courses and Lectures No. 372, Ed. E. Kuljanic, ISBN:3-211-82808, Springer-Verlag, Wien New York, Udine, 2-3 Settembre, 1996, pag. 593-600

[Adm97] Lanzetta, M.: Rasterisation of 2-D profiles with Unlimited Resolution through Artificial Vision Techniques: an Application to the Wood Industry, 10th ADM Conference, Atti del 10° Congresso Internazionale su «Design Tools and Methods in Industrial Engineering», Ed. Università di Firenze, ISBN: 88 7957 113-3, Firenze, 17-19 Settembre, 1997, pag. 311-316

[Aitem99] Lanzetta, M.; Tantussi, G.; Santochi, M.: An Approach to On-line Welding Control through an Artificial Vision System, A.I.Te.M IV, Atti del IV Convegno della Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica, Brescia, 13-15 Settembre, 1999, pag. 501-509

[Ampt99] Lanzetta, M.; Tantussi, G.: A Flexible High-Resolution Vision Sensor for Tool Condition Monitoring, AMPT'99 and IMC16, Proceedings of the International Conference "Advances in Materials and Processing Technologies" and XVI Annual Meeting of the Irish Manufacturing Committee, Dublin, Ireland, 3-4 August, 1999, vol. 1, pp. 569-593, Published by Dublin City University, Editors Prof. M.S.J. Hashmi and Dr. L. Looney.

[Iwk96] Lanzetta, M.: Tool Condition Monitoring Using an Artificial Vision System: Application of Blob Analysis to End Mills, 41. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Band 1, Ed. Technische Universitat Ilmenau, ISBN: 0943-7207, Ilmenau, Germania, 23-26 Settembre, 1996, pag. 581-586

[ROC03] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V., A Multi-axis Machine for Single Diamond Bead Testing, Roc Maquina - Dimension Stone Industry, num. 51, pp. 30-33, 2003

[Aitem03] Tantussi, G.; Lanzetta, M.; Romoli, V., Diamond Wire Cutting of Marble: State of the Art, Modeling and Experiments with a New Testing Machine, A.I.Te.M VI, Proceedings of the 6th International Conference of the Italian Association of Mechanical Technology, Enhancing the Science of Manufacturing, vol. Unico, pp. 113-126, Gaeta (LT), Italy 2003

[Aitem] Carrino L., Di Ilio A.M., Monno M., Tantussi G., Turchetta S., Manufacturing technologies of ornamental stones, A.I.Te.M VI, Proceedings of the 6th International Conference of the Italian Association of Mechanical Technology, Enhancing the Science of Manufacturing, vol. Unico (CD-ROM), pp. 1-14, Gaeta (LT), Italy 2003

- [OCR] Lanzetta, M.: The Introduction of a New Functionality in Existing Industrial Products: the Case of OCR in an Artificial Vision System, Proceedings of the 10th International ADM Conference «Design Tools and Methods in Industrial Engineering», Florence (Italy), September 17th-19th, 1997, pp. 301-310 (10), Published by Università di Firenze, 1997, ISBN: 88 7957 113-3.
- [PUNCH] Evers, C. and Kammerer, B., 1989, "Recognition of Punched Characters on Workpiece by Matching of Gradients with thin Reference Pattern", Proc. 6th Scandinavian Conf. on Image Anal., vol. 1, Finland, June 19-22, p. 577-584
- [SEG] Lee, S. W. and Lee, D. J., 1994, "A New Methodology for Gray Scale Character Segmentation and Recognition", IEEE Trans., vol. PAMI-16, n. 4, Apr.
- [ORIENT] Duren, R., 1991, "A comparison of second order neural networks to transform-based method for translation- and orientation- invariant object recognition", Proc. of the 1991 IEEE Workshop, p. 198-207
- [GEN] Drucker, H. and Le Cun, Y., 1991, "Improving Generalisation Performance in Character Recognition", Proc. of the 1991 IEEE Workshop, Princeton (NJ), Sept. 30-Oct. 1, p. 198-207
- Pavlidis, T. and Mori, S., 1992, "Optical Character Recognition: The Issue", Proc. of the IEEE., vol. 80, n. 7, July, p. 1027-1057.
- [ANN] Schantz, H. F., 1991, "An Overview of Neural OCR Networks", Journal of Information on System Management, vol. 8, n. 2, Spring, p. 22-27